

强化学习 tutorial

甄景贤 (King-Yin Yan)

General.Intelligence@Gmail.com

1 什么是强化学习?

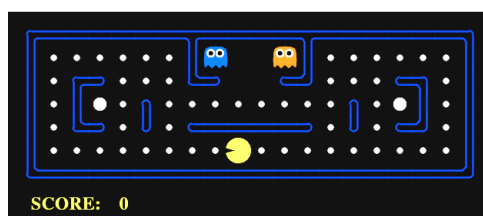
Reinforcement learning 是机器学习里面的一个分支，特别善於控制一只能够在某个环境下 **自主行动** 的个体 (autonomous agent)，透过和 **环境** 之间的互动，例如 sensory perception 和 rewards，而不断改进它的 **行为**。

听到强化学习，你脑里应该浮现一只甲由那样的小昆虫，那就是 autonomous agent 的形象：



(1)

对「环境」(environment) 这概念，你应该想到像以下这经典游戏的迷宫：



(2)

包括有追捕你的怪物、和吃了会加分的食物（这些代表负值和正值的 rewards）。当然，实际应用的「环境」和「奖励」可以是抽象的，这游戏是一个很具体的例子。

1.1 输入 / 输出

记住，reinforcement learning 的 **输入** 是：

- 状态 (States) = 环境，例如迷宫的每一格是一个 state

- 动作 (Actions) = 在每个状态下，有什么行动是容许的
- 奖励 (Rewards) = 进入每个状态时，能带来正面或负面的价值 (utility)

而输出就是：

- 方案 (Policy) = 在每个状态下，你会选择哪个行动？

於是这 4 个元素的 tuple $(S A R P)$ 就构成了一个强化学习的系统。在抽象代数中我们常常用这 tuple 的方法去定义系统或结构。

再详细一点的例子就是：

- states S = 迷宫中每一格的位置，可以用一对座标表示，例如 (1,3)
- actions A = 在迷宫中每一格，你可以行走的方向，例如：{ 上，下，左，右 }
- rewards R = 当前的状态 (current state) 之下，迷宫中的那格可能有食物 (+1)、也可能有怪兽 (-100)
- policy P = 一个由状态 \rightarrow 行动的函数，意即：这函数对给定的每一个状态，都会给出一个行动。

(S, A, R) 是使用者设定的， P 是算法自动计算出来的。

1.2 人与虫之间

第一个想到的问题是：为什么不用这个方法打造人工智能？但现时的强化学习算法，只对比较细小和简单的环境适用，对於大的复杂的世界，例如象棋的 10^{xxx} 状态空间，仍是 intractable 的。

关键就是，高等智慧生物会在脑中建立世界的模型 (world model) 或知识 (knowledge)，而强化学习只是关心简单的「状态—行动」配对。

强化学习的领导研究者 Richard Sutton 认为，只有这种学习法才考虑到自主个体、环境、奖励等因素，所以它是人工智能中最 top-level 的 architecture，而其他人工智

能的子系统，例如 logic 或 pattern recognition，都应该在它的控制之下，我觉得颇合理。



(3)

所以要制造 strong AI，一个可能的方案就是结合强化学习和某种处理复杂 world model 的能力：



(4)

「你们已经由虫进化成人，但在你们之内大部份仍是虫。」

— 尼采, Thus spoke Zarathustra

「如果人类不相信他们有一天会变成神，他们就肯定会变成虫。」

— Henry Miller

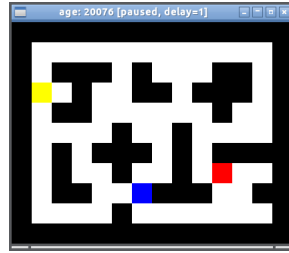
1.3 程式

学 AI 最紧要有 program，不然就会很枯燥。这是我在网上找到的一个特别简单的 demo，作者是 Travis DeWolf：

Reinforcement learning demo

只要 Python 便可运行，但你可能要 install PyGame。

猫、老鼠、芝士：



(5)

猫的行动是简单地朝着老鼠追（没有智能），老鼠的行动是学习出来的。

注意，在 main program 和 cellular.py 这两部分，纯粹是定义了迷宫世界如何运作，基本上是一个 game，里面完全没有智能，你可以用 {上、下、左、右} 控制各 agent 的活动，如此而已。

强化学习的程式在 qlearn.py，很短，而真正学习的程式基本上只有一句，就是：

```
def learnQ(self, state, action, reward, value):
    oldv = self.q.get((state, action), None)
    if oldv is None:
        self.q[(state, action)] = reward
    else:
        self.q[(state, action)] = oldv + self.alpha * (value - oldv)
```

单是这一句程式，就能令老鼠学到避开猫、吃芝士。以下再解释....

1.4 強化學習的原理

《AI — a modern approach》这本书第 21 章有很好的简介。《AIMA》自然是经典，很多人说他们是读这本书而爱上 AI 的。这本书好处是，用文字很耐性地解释所有概念和原理，思路很清晰，使读者不致有杂乱无章的感觉。例如 21 章首先讲 passive reinforcement learning，意思是当 policy 是固定时，纯粹计算一下 agent 期望的价值 (utility，即 rewards 的总和) 会是多少。有了这基础后再比较不同 policies 的好坏。这种思路在数学中很常见：首先考虑简单到连白痴也可以解决的 case，然后逐步引入更多的复杂性。例如数学归纳法，由 $N = 1$ 的 case 推到 $N \rightarrow \infty$ 。

为免重复，我只解释到明白 Q learning 的最少知识。

1.5 Utility (价值, 或效)

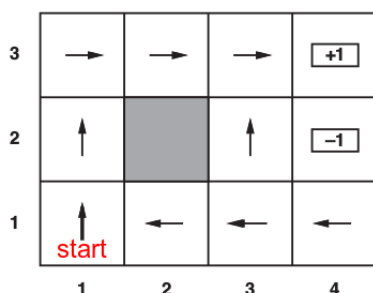
U 是一连串行动的 rewards 的总和。例如说, 行一步棋的效用, 不单是那步棋当前的利益, 还包括走那步棋之后带来的后果。例如, 当下贪吃一只卒, 但 10 步后可能被将死。又或者, 眼前有美味的食物, 但有些人选择不吃, 因为怕吃了会变肥。

一个 state 的效用 U 就是: 假设方案固定, 考虑到未来所有可能的 transitions, 从这个 state 开始的平均期望的 total reward 是多少:

$$U(S_0) = \mathbb{E} \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(S_t) \right]$$

其中 $\mathbb{E}[\]$ 代表期望值, γ 是 discount factor, 例如 0.9 或什么。

实例: 考虑这简单的迷宫:



(6)

那些箭咀表示的是众多可能方案中的其中一个。

根据这个方案, 由 (1,1) 开始的运行可能是这个结果:

$$\begin{array}{ccccccccccc} (1,1) & \rightsquigarrow & (1,2) & \rightsquigarrow & (1,3) & \rightsquigarrow & (1,2) & \rightsquigarrow & (1,3) & \rightsquigarrow & (2,3) & \rightsquigarrow & (3,3) & \rightsquigarrow & (4,3) \\ -0.04 & & -0.04 & & -0.04 & & -0.04 & & -0.04 & & -0.04 & & -0.04 & & +1 \end{array} \quad (7)$$

下面橙色的值是每个 state 的 reward。在这例子中, 每个不是终点的格, 也会扣 0.04 分。

但从同一起点, 同一方案, 也可以出现不同结果, 例如在 (1,3) 企图向右爬, 但实际结果是向下跌一格; 这些 state transitions 是由外在世界的机率决定的。(例如某人读了大学文凭, 但遇上经济不景, 他的薪水未必能达到行动的预期效果。)

同一方案的运行结果可以是：

$$\begin{array}{ccccccccccc} (1,1) & \rightsquigarrow & (1,2) & \rightsquigarrow & (1,3) & \rightsquigarrow & (2,3) & \rightsquigarrow & (3,3) & \rightsquigarrow & (3,2) & \rightsquigarrow & (3,3) & \rightsquigarrow & (4,3) \\ -0.04 & & -0.04 & & -0.04 & & -0.04 & & -0.04 & & -0.04 & & -0.04 & & +1 \end{array} \quad (8)$$

或者：

$$\begin{array}{ccccccc} (1,1) & \rightsquigarrow & (2,1) & \rightsquigarrow & (3,1) & \rightsquigarrow & (3,2) & \rightsquigarrow & (4,2) \\ -0.04 & & -0.04 & & -0.04 & & -0.04 & & -1 \end{array} \quad (9)$$

1.6 Bellman condition

这是 dynamic programming（动态规划）的中心思想，又叫 Bellman optimality condition。

在人工智能里我们叫 reinforcement learning，但在控制论的术语里叫 dynamic programming，两者其实是一样的。Richard Bellman 在 1953 年提出这个方程，当时他在 RAND 公司工作，处理的是运筹学的问题。他也首先使用了“curse of dimensionality”这个术语，形容动态规划的主要障碍。

考虑的问题是：要做一连串的 sequential decisions。

Bellman equation 说的是：「如果从最佳选择的路径的末端截除一小部分，余下的路径仍然是最佳路径。」

换句话说，如果一系列的选择 A B C D E... 是最优的，那么这系列除去开始的 A，那 B C D E... 系列应用在后继的状态上也是最优的。

（例如，你从香港乘车到北京，选择了最便宜的路线，此路线经过 10 个车站，第二站是深圳：

香港 → 深圳 → → 北京

但如果除去出发点香港站，那么由第二站深圳到最后的北京站：

深圳 → → 北京

这路线仍然是余下 9 个站之间最便宜的。)

用数学表示：

$$U^*(S) = \max_a \{R(a) + U^*(S')\}$$

$$U^*(\text{全路径}) = \max_a \{R(\text{在当前状态下选取 } a) + U^*(\text{余下路径})\}$$

* 表示 **最优** (optimal)。这条看似简单的式子是动态规划的全部内容；它的意义是：我们想获得最佳效益的路径，所以将路径切短一些，於是问题化解成一个较小的问题；换句话说它是一个 recursive relation。

1.7 Delta rule

这只是一个简单的 trick，在机器学习中经常出现。假设我们有一个理想，我们要逐步调教当前的状态，令它慢慢趋近这个理想。方法是：

$$\text{当前状态} := \text{当前状态} + \alpha(\text{理想} - \text{当前状态})$$

其中 α 叫「学习速度 (learning rate)」。“Delta” (Δ) 指的是理想和现状之间的差异。

很明显，只要反覆执行上式，状态就会逐渐逼近理想值。

(Delta rule 的微分形式就是我们熟悉的「梯度下降」： $x += \eta \cdot \frac{dy}{dx}$)

1.8 Temporal difference (TD) learning

将 delta rule 应用到 Bellman condition 上，去寻找最优路径，这就是 temporal difference learning。

我们还是从简单情况开始：假设方案固定，目标是学习每个 state 的 utility。

理想的 $U(S)$ 值，是要从 state S 开始，试验所有可能的 transitions，再计算这些路径的 total rewards 的平均值。

但实际上，agent 只能够每次体验一个行动之后的 state transition。

所以要应用 Bellman condition：一个 state S 的 U 值，是它自身的 reward，加上所有可能的后继 states 的 U 值，取其机率平均，再乘以 discount factor γ ：

$$U(S) = R(S) + \gamma \sum_{S'} P(S \rightarrow S') U(S')$$

其中 P 是 transition 的机率， S' 是后继 state， \sum 是对所有后继 states 求和。换句话说，这是理想的 $U(S)$ 和 $U(S$ 的后继) 之间的关系，是一个 recursive relation。

例如，假设 agent 现时对 state (1,3) 和 state (2,3) 的估值，分别为 0.84 和 0.92。又假设 agent 察觉到，根据现有方案，在 (1,3) 时总是会发生跳到 (2,3) 这个 transition。那么这两个 states 的 U 值，应该符合这条约束：

$$U(1,3) = -0.04 + U(2,3)$$

换句话说，这是两个 states 之间， U 值的 local (局部的) 约束。

TD learning 的思想是：假设其他 $U(S')$ 的值正确，利用 Bellman optimality 来调整当下 state 的 $U(S)$ 。当尝试的次数多了，所有 U 值都会趋向理想。Agent 只需要用这条 update rule：

$$U(S) += \alpha (R(S) + \gamma U(S') - U(S))$$

α 是 learning rate，它决定学习的速度（但它不能太大，避免 overshooting）。后面那东西是 $U(S)$ 和 $U(S')$ 的估值 (estimation) 之间的差别。对于理想的 $U(S)$ 和 $U(S')$ ，那差别会是 0。而在每个 time step，我们只是用 α 部分地调整这个差别。

最后一提，在上面理想约束的公式里，有对于机率 P 的求和，但在 update formula 中 P 不见了。那是因为 agent 在环境中的行动，暗含了对于 state transition 机率的 sampling (随机地取样本)。换句话说，那机率求和是由 agent 本身体现的。

P 是 state transitions 的机率，换句话是关于世界的一个 model。TD learning 不需要学习 P ，所以叫 model-free learning。但正如开篇时说过，model-free 并不一定是好事，人的智慧就是基于我们对外在世界有一些很好的 models。

1.9 Q value

Q 值只是 U 值的一个变种； U 是对每个 state 而言的， Q 把 U 值分拆成每个 state 中的每个 action 的份量。换句话说， Q 就是在 state S 做 action A 的 utility。

Q 和 U 之间的关系是：

$$U(S) = \max_A Q(A, S)$$

Q 的好处是什么？下面将会介绍 active learning，而 Q value 配合 TD learning，可以在 active learning 中也消除 P ，达到 model-free 的效果。

上面的 update rule 只要用这个关系改写就行：

$$U(S) += \alpha (R(S) + \gamma \max_{A'} Q(A', S') - Q(A, S))$$

1.10 Active learning

在 passive learning 中，方案不变，我们已经能够计算每个 state S 的效用 $U(S)$ ，或者每个 state S 之下行动 A 的效用 $Q(S, A)$ 。

如果方案是可以改变的，我们只需计算不同方案的 Q 值，然后在每个 state S 选取相应於最大 Q 值的行动 A ，那就是最佳方案，不是吗？

实际上执行的结果，却发现这些 agent 的方案很差！原因是，学习过程中的 Q 值是 estimate，不是理想的 Q 值，而如果根据这样的 Q 行动，agent 变得很短视，不会找到 optimal policy。（例如，某人经常吃同一间餐馆，但循另一路径走，可以发现更好的餐馆。）

Agent 需要尝试一些未知的状态 / 行动，才会学到 optimal policy；这就是所谓的 exploration vs exploitation（好奇心 vs 短暂贪婪）之间的平衡。

方法是，人工地将未知状态的价值增加一点：

$$U(S) = R(S) + \gamma \max_A \mathcal{F} \left[\sum_{S'} P(S \rightarrow S') U(S'), N(A, S) \right]$$

其中 $N(A, S)$ 是状态 S 和行动 A 这对组合出现过（被经历过）的次数， \mathcal{F} 是 exploration 函数，它平时回覆正常的 U 的估计值，但当 N 很小时（亦即我们对 S, A 的经验少），它会回覆一个比较大的估值，那代表「好奇心」的效用。